

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl<sup>7</sup>

G01N 33/20

G01L 1/00

## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 01140712.3

[43] 公开日 2002 年 4 月 17 日

[11] 公开号 CN 1344932A

[22] 申请日 2001.8.31 [21] 申请号 01140712.3

[30] 优先权

[32] 2000.8.31 [33] JP [31] 264716/00

[71] 申请人 川崎制铁株式会社

地址 日本兵库县

共同申请人 独立行政法人物质、材料研究机构

[72] 发明人 高木周作 津崎兼彰 井上忠信

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 魏金玺 钟守期

权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图页数 6 页

[54] 发明名称 钢制部件的形状、工作应力和使用环境的  
设定方法

[57] 摘要

通过适当地设定抗拉强度高于 1000MPa 的高强度钢部件的形状、工作 应力和使用环境,可以有效地防止延迟断裂。为此,求出临界扩散性氢量( $H_C$ )与 Weibull 应力的关系,另外,求出钢制部件使用过程中侵入钢中的侵入扩散性氢量( $H_E$ ),接着,求出与上述侵入扩散性氢量( $H_E$ )相等的上述临界扩散性氢量( $H_C$ )的 Weibull 应力,设定钢制部件的形状和工作应力,使之低于上述求出的 Weibull 应力。

## 权 利 要 求 书

1. 一种钢制部件的形状和工作应力的设定方法, 其特征在于, 求出临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 与 Weibull 应力的关系, 另外, 求出钢制部件使用过程中侵入的  
 5 侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ), 接着, 求出与上述侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ) 相等的上述临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 的 Weibull 应力, 设定钢制部件的形状和工作应力, 使之成为在上述求出的 Weibull 应力以下。

2. 权利要求 1 所述的钢制部件的形状和工作应力的设定方法, 其特征在于, Weibull 应力是采用有限元法、使用电子运算装置按下列公式 1:

10

$$\sigma_w = \left[ \frac{1}{V_0} \int_{V_f} (\sigma_{eff})^m dV_f \right]^{\frac{1}{m}}$$

计算出来的。

3. 一种钢制部件的使用环境的设定方法, 其特征在于, 求出临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 与 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ ) 的关系, 另外, 根据实际使用的钢制部件的形  
 15 状和工作应力求出实际使用的钢制部件的 Weibull 应力 ( $\sigma_w B$ ), 再求出与该 Weibull 应力 ( $\sigma_w B$ ) 相等的 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ ) 的临界扩散性氢量 ( $H_c$ ), 设定钢制部件的使用环境, 以使钢制部件使用过程中侵入钢中的侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ) 低于上述  $H_c$ 。

4. 权利要求 3 所述的钢制部件的使用环境的设定方法, 其特征在于, Weibull  
 20 应力是采用有限元法、使用电子运算装置按下列公式 1:

$$\sigma_w = \left[ \frac{1}{V_0} \int_{V_f} (\sigma_{eff})^m dV_f \right]^{\frac{1}{m}}$$

计算出来的。

5. 一种钢制部件的延迟断裂的判定方法, 其特征在于, 求出临界扩散性氢  
 25 量 ( $H_c$ ) 与 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ ) 的关系, 另外, 求出钢制部件使用过程中侵入

01.09.03

钢中的侵入扩散性氢量 ( $H_E$ )，接着，求出与上述侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ) 相等的上述临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 的 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ )，将该 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ ) 与根据使用中的钢制部件的形状和工作应力算出的 Weibull 应力 ( $\sigma_w B$ ) 进行比较，当前者大于后者时，判定该钢制部件不会发生延迟断裂。

5

钢制部件的形状、工作应力  
和使用环境的设定方法

5

技术领域

本发明是关于预防钢制部件延迟断裂的方法，特别是关于旨在预防延迟断裂的钢制部件的形状、工作应力和使用环境的设定方法。更具体地说，本发明是关于在使用抗拉强度超过 1 0 0 0 M P a 的高强度钢的钢制部件中，为了预防延迟  
10 断裂而设定钢制部件的形状、工作应力和使用环境的方法。

背景技术

近年来，陆续研制出一些抗拉强度高于 1 0 0 0 M P a 的高强度钢。现已发现，这样的高强度钢有可能发生延迟断裂，因此目前很少能达到实用化。所谓延迟断裂，是指高强度钢在受到其抗拉强度以下的应力时，经过一些时间后突然断  
15 裂的现象。

在钢制部件所受到的载荷应力相同的情况下，由于钢制部件的形状而产生的应力集中不同，有时发生延迟断裂，有时不发生延迟断裂。因此，以往，对于有可能发生延迟断裂的钢制部件，在进行形状设计时一般避免出现应力集中。但是，实际上尽管对钢制部件的形状设计下了许多功夫，仍然不能确保防止延迟断裂发  
20 生。因此，例如象螺栓一类形状复杂的钢制部件，在设计时往往采用非常大的安全系数。

作为另一种防止延迟断裂的方法，有人探讨了增大临界扩散性氢量 ( $H_c$ )、即钢制部件不发生断裂的最大扩散氢量的方案。但是，这种方法也未能成功地确保防止延迟断裂。

25 本发明的目的是解决上述现有技术存在的问题。本发明的课题如下。准确地预测钢制部件是否发生延迟断裂；通过适当地设定钢制部件的形状、工作应力和使用环境，确保防止发生延迟断裂；即使是形状复杂的钢制部件，也可以采用恰当的安全系数进行设计。

发明的公开

30 为了解决上述课题，本发明提供了下述方法。本发明是钢制部件的形状和工

作应力的设定方法，其特征在于，求出临界扩散性氢量（ $H_c$ ）与 Weibull 应力的关系，另外，求出钢制部件使用过程中侵入钢中的侵入扩散性氢量（ $H_E$ ），接着，求出与上述侵入扩散性氢量（ $H_E$ ）相等的上述临界扩散性氢量（ $H_c$ ）的 Weibull 应力，设定钢制部件的形状和工作应力，使之在上述求出的 Weibull 应力以下。

- 5        在本发明中，优选的是，Weibull 应力是采用有限元法、使用电子运算装置按下列公式 1 计算出来的。

公式 1

$$\sigma_w = \left[ \frac{1}{V_0} \int_{V_f} (\sigma_{eff})^m dV_f \right]^{\frac{1}{m}}$$

- 10        另外，本发明是钢制部件的使用环境的设定方法，其特征在于，求出临界扩散性氢量（ $H_c$ ）与 Weibull 应力（ $\sigma_w A$ ）的关系，另外，根据实际使用的钢制部件的形状和工作应力求出实际使用的钢制部件的 Weibull 应力（ $\sigma_w B$ ），再求出与该 Weibull 应力（ $\sigma_w B$ ）相等的 Weibull 应力（ $\sigma_w A$ ）的临界扩散性氢量（ $H_c$ ），设定钢制部件的使用环境，使钢制部件使用过程中侵入钢中的侵入扩散性氢量
- 15        （ $H_E$ ）低于上述  $H_c$ 。

优选的是，上述 Weibull 应力（ $\sigma_w A$ ）和 Weibull 应力（ $\sigma_w B$ ）是采用有限元法、使用电子运算装置按上述公式 1 计算出来的。

- 此外，本发明是钢制部件的延迟断裂的判定方法，其特征在于，求出临界扩散性氢量（ $H_c$ ）与 Weibull 应力（ $\sigma_w A$ ）的关系，另外，求出钢制部件使用过程中
- 20        中侵入钢中的侵入扩散性氢量（ $H_E$ ），接着，求出与上述侵入扩散性氢量（ $H_E$ ）相等的上述临界扩散性氢量（ $H_c$ ）的 Weibull 应力（ $\sigma_w A$ ），将该 Weibull 应力（ $\sigma_w A$ ）与根据使用中的钢制部件的形状和工作应力算出的 Weibull 应力（ $\sigma_w B$ ）进行比较，当前者大于后者时，判定该钢制部件不会发生延迟断裂。

本发明是基于本发明人所获得的下列二个见解而完成的。

- 25        （1）延迟断裂的发生可以通过 Weibull 应力  $\sigma_w$  和临界扩散性氢量（ $H_c$ ）准确地预测。即，不需要考虑钢制部件形状和工作应力条件的影响，就可以预测延迟断裂的发生。

（2）就不发生延迟断裂的条件而言，与钢制部件使用过程中侵入钢中的扩

散性氢量 ( $H_E$ ) 相比, 上述临界扩散性氢量 ( $H_C$ ) 的作用更大。

附图的简单说明

图 1 是例示本发明的操作程序的图。

图 2 是说明有可能发生断裂的区域  $V_f$  的图。

5 图 3 是表示距缺口的低部的距离与最大主应力的关系的图。

图 4 表示 Weibull 应力 ( $\sigma_w$ ) 的计算结果与临界扩散性氢量 ( $H_C$ ) 测定结果的关系。

图 5 表示平均载荷应力 ( $\sigma_{ave}$ ) 的计算结果与临界扩散性氢量 ( $H_C$ ) 测定结果的关系。

10 图 6 表示 Weibull 应力 ( $\sigma_w$ ) 对于延迟断裂发生率的影响。

图 7 表示平均载荷应力 ( $\sigma_{ave}$ ) 对于延迟断裂发生率的影响。

实施发明的最佳方式

下面说明实施本发明的最佳方式。本发明中使用的术语的含义如下。

15 所述的临界扩散性氢量 ( $H_C$ ), 是指在某一载荷条件下试片不断裂的场合钢中所含有的最大的扩散性氢量。临界扩散性氢量 ( $H_C$ ) 例如可以采用下述方法通过试验测定。即, 在电解液中, 以钢试片作为阴极施加电压时, 使氢进入钢中。为了使氢均匀扩散到试片中, 必要时可以在试片表面上镀 Cd, 然后在室温下保持或者加热。对该试片施加一定的载荷, 测定 100 小时后未断裂的试片的最大扩散性氢量。扩散性氢量按下面所述的方法测定。以每 1 小时 50℃ 以上、  
20 800℃ 以下的一定梯度将试片加热至 350℃, 测定这期间释放出的氢量。释放出的氢量例如可以使用 4 极质谱仪或气相色谱定量测定。

25 所述的侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ), 是指在实际使用环境中侵入钢中的最大的氢量。 $H_E$  是根据实际的钢制部件使用环境通过经验或实验求出。通过实验求出时, 将试片设置在尽可能忠实再现使用环境的试验机中, 进行曝露实验。氢量的测定方法与上述  $H_C$  的氢量的测定方法相同。

所述的 Weibull 应力 ( $\sigma_w$ ) 是通过数学处理计算出的应力。可以根据钢制部件的形状的工作应力计算出来。计算方法有几种。本发明中是采用有限元法按公式 1 计算求出。

公式 1

$$\sigma_w = \left[ \frac{1}{V_0} \int_{V_f} (\sigma_{eff})^m dV_f \right]^{\frac{1}{m}}$$

式中,

5  $\sigma_{eff}$  表示最大主应力, 是支配断裂的力。

$V_0$  表示有可能发生断裂的区域的基本体积。 $V_0$  可以是任意的常数, 无论取何值, 对于 Weibull 应力的相对的比较都没有影响。 $V_0$  例如可以设定为  $1 \text{ mm}^3$ 。

10  $V_f$  表示有可能发生断裂的区域。例如, 如图 2 中所示, 相对于应力 ( $\sigma$ ) 是由斜线表示的区域。

$m$  是被称为 Weibull 形状参数的常数。一般是  $10 - 30$ 。如果按以上所述设定计算条件, 就可以采用有限元法、用电子计算机计算 Weibull 应力。

下面详细说明本发明的代表例。图 1 是表示本发明的操作程序的图示。首先, 用简单形状的试片测定临界扩散性氢量 ( $H_c$ ), 计算出 Weibull 应力, 求出两者的关系, 制成临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) - Weibull 应力 ( $\sigma_w$ ) 曲线。图 4 是该曲线的代表例。另外, 通过实验测定或者根据经验值预测钢制部件使用过程中侵入钢中的侵入扩散性氢量 ( $H_E$ )。然后, 根据该曲线求出与侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ) 相等的临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 的 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ )。设计实际使用的钢制部件的形状和工作应力条件, 使 Weibull 应力 ( $\sigma_w B$ ) 小于上述求出的 Weibull 应力

20 ( $\sigma_w A$ )。即, 实际使用的钢制部件的形状的应力条件设定为  $\sigma_w A > \sigma_w B$ 。只要  $\sigma_w A > \sigma_w B$ , 该钢制部件就不会发生延迟断裂。如果  $\sigma_w A \leq \sigma_w B$ , 该钢制部件就有可能发生延迟断裂。在这种情况下, 修正实际使用的钢制部件的形状和工作应力条件, 重新算出 Weibull 应力 ( $\sigma_w B$ )。反复进行上述修正, 直至  $\sigma_w A > \sigma_w B$ 。这样, 就可以最适当地设计实际使用的钢制部件的形状的工作应力条件。

25 本发明是按下述原则来设定钢制部件的使用环境条件, 即, 使钢制部件使用过程中侵入钢中的侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ) 小于根据实际使用的钢制部件形状和工作应力计算出的 Weibull 应力 ( $\sigma_w B$ ) 的临界扩散性氢量 ( $H_c$ )。也就是说, 按照  $H_c > H_E$  来设定实际的钢制部件的使用环境条件。所谓使用环境条件, 是指例

如使用钢制部件的场所的温度、湿度、气氛气体成分、大气中的悬浮盐分等。具体地说，是指在海岸地带、汽车的发动机室或高速公路的隧道内等使用钢制部件的环境。

本发明的钢制部件的延迟断裂的判定方法是，求出临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 与 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ ) 的关系，另外，求出钢制部件使用过程中侵入钢中的侵入扩散性氢量 ( $H_E$ )，接着，求出与上述侵入扩散性氢量 ( $H_E$ ) 相等的上述临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 的 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ )，将该 Weibull 应力 ( $\sigma_w A$ ) 与根据使用中的钢制部件的形状和工作应力算出的 Weibull 应力 ( $\sigma_w B$ ) 进行比较，当前者大于后者时，判定该钢制部件不会发生延迟断裂。采用本发明，可以准确地判定钢制部件是否延迟断裂。

采用本发明，即使实际使用的钢制部件的形状十分复杂，也可以采用恰当的安全系数进行设计。因而，迄今为止难以实用的、抗拉强度高于 1 0 0 0 MPa 的高强度钢变得容易实用化。进而可以减轻各种装置、机械的重量，提高全社会的能量使用效率。

另外，本发明与钢制部件的组成无关，可以适用于所有成分系的钢材，特别是适合于以往很少实际使用的、抗拉强度超过 1 0 0 0 MPa 的高强度钢。

#### 实施例

表 1 中示出延迟断裂试验的实施条件。表 1 中的符号说明如下。K t 是应力集中系数。K t 是由试片的缺口形状决定的常数。例如，没有缺口的试片，K t 是 1.0。 $\sigma_w$  是计算得到的 Weibull 应力。 $\sigma_{max}$  是最大载荷应力。 $\sigma_{ave}$  是平均载荷应力。 $H_c$  是测定的临界扩散性氢量。使用的钢材的抗拉强度大约是 1400MPa。其化学成分(质量%)是C:0.40%、Si:0.24%、Mn:0.8%、P:0.02%、S:0.007%、Cr:1.0%、Mo:0.16%，余量是 Fe 和不可避免的杂质。试片的形状是直径 10mm 的圆棒，其中间部位具有环状的切口。测定各种不同条件下的临界扩散性氢量( $H_c$ )。用市售的数学分析用软件、采用有限元法(阴解法)计算出各条件下的 Weibull 应力 ( $\sigma_w$ )。上述 Weibull 应力 ( $\sigma_w$ ) 的计算条件是， $V_0 = 1 \text{ mm}^3$ ， $m = 20$ 。设定  $m = 20$  是因为，只有在这种情况下， $\sigma_w$  和  $H_c$  才具有单一确定的关系，不受 K t 的影响。图 3 中示出用于计算的最大主应力  $\sigma_{eff}$  的代表例。图 3 表示距试片的缺口底部的距离与最大主应力  $\sigma_{eff}$  的关系。该例是表 1 中 K t = 4.9、载荷应力 / 缺口拉伸强度 = 0.47 的例子。由图 3 可以看出，最大主应力  $\sigma_{eff}$  在拉伸方向上是变化的。在缺



口底部附近达到最大值 2 5 4 4 M P a , 随着到缺口底部的距离增大而急骤降低。在距缺口底部较远的地方达到 5 8 7 M P a 的恒定值。在缺口底部没有达到最大值是因为在该例中部分材料屈服, 发生塑性变形的缘故。图 2 中示意地表示在 Weibull 应力 ( $\sigma_w$ ) 的计算中所使用的区域  $V_f$ 。  $V_f$  是有可能发生断裂的区域。

5 图 4 中示出 Weibull 应力 ( $\sigma_w$ ) 的计算结果与临界扩散性氢量 ( $H_c$ ) 的测定结果的关系。由图 4 可以看出,  $\sigma_w$  与  $H_c$  具有一定的关系, 不受  $K t$  的影响。这一见解对于预测延迟断裂的发生具有极其重要的意义。钢材中的侵入扩散性氢量( $H_E$ ) 可以根据使用环境通过经验来预测。钢材中的  $H_E$  是 0.05-0.09ppm。由图 4 可以看出,  $H_c$  达到 0.09ppm 时的  $\sigma_w$  是 2300MPa。因此, 在  $\sigma_w$  小于 2300MPa 的条件下, 可以  
10 预测该钢制部件的延迟断裂发生率是 0。

图 5 中示出平均载荷应力( $\sigma_{ave}$ )的计算结果与临界扩散性氢量( $H_c$ )的测定结果的关系。由图 5 可以看出,  $\sigma_{ave}$  与  $H_c$  的关系是不确定的, 受  $K t$  的影响很大。该钢材的  $H_E$  是 0.05-0.09ppm。但是, 根据图 5, 无论在什么样的平均载荷应力 ( $\sigma_{ave}$ ) 条件下, 该钢制部件的延迟断裂发生率都是 0, 或不能准确地预测其延迟断裂的发生。  
15 这是因为, 如果应力集中系数  $K t$  不同, 满足  $H_c > H_E$  的  $\sigma_{ave}$  就会不同。

由图 4 可以看出, 在  $\sigma_w$  低于 2 3 0 0 M p a 的条件下, 该钢制部件的延迟断裂发生率预测结果为 0。为了确认该预测结果是否正确, 进行了实验。在与进行延迟断裂实验相同的应力条件下进行暴露实验。实验方法是, 对试片施加一定的载荷, 早、晚 2 次喷吹 3 % 食盐水, 经过 1 0 0 小时后观察是否断裂。延迟断裂  
20 发生率是在每一条件下对 2 0 片试片进行上述暴露实验、将断裂的试片数量除以 2 0 所得到的值。

图 6 中示出暴露实验结果。图 6 表示  $\sigma_w$  对于延迟断裂发生率的。在  $\sigma_w$  低于 2 3 0 0 M p a 的条件下, 延迟断裂发生率是 0。在 2 3 0 0 M P a 以上的条件下, 延迟断裂发生率随着  $\sigma_w$  的增加而升高。由此可知, 根据图 4 预测该钢制部  
25 件在  $\sigma_w$  小于 2 3 0 0 M P a 的条件下延迟断裂发生率是 0 的结果是正确的。即, 即使钢制部件的形状与延迟断裂实验所使用的试片形状不同, 只要按照  $\sigma_w$  低于 2 3 0 0 M P a 的条件进行设计就可以预防延迟断裂。

图 7 中示出  $\sigma_{ave}$  对于延迟断裂发生率的影响。以往都是使用图 7 来预测延迟断裂。应力集中系数  $K t$  不同时, 延迟断裂发生率为 0 的临界  $\sigma_{ave}$  是不同的。无论在  
30 什么样的  $\sigma_{ave}$  条件下, 该钢制部件的延迟断裂发生率都是 0, 不可能准确地预测。

因此难以预测与进行延迟断裂实验的试片形状不同的钢制部件的延迟断裂的发生。采用以往的方法，难以设计未进行延迟断裂实验的形状的钢制部件。

### 产业上的应用

- 5 根据本发明可以正确地预测钢制部件是否发生延迟断裂。通过适当地设定钢制部件的形状、工作应力和使用环境，可以有效地防止延迟断裂。即使实际使用的钢制部件具有复杂的形状，也可以采用适当的安全系数进行设计。从而使得以往难以实用的、抗拉强度超过 1 0 0 0 MP a 的高强度钢容易达到实用化，结果，可以减轻各种装置和机械的重量，提高作为全社会的能量使用效率。

延迟断裂试验条件

试片直径 /mm	Kt	载荷应力/缺口 拉伸强度	$\sigma_w$ /MPa	$\sigma_{max}$ /MPa	$\sigma_{ave}$ /MPa	Hc/mass ppm	延迟断裂 发生率
10	6.9	0.86	2930	3434	1849	0.0692	1.00
10	6.9	0.72	2715	3274	1543	0.0794	0.80
10	6.9	0.47	2334	2860	1004	0.0908	0.10
10	6.9	0.40	2196	2710	841	0.1408	0.00
10	6.9	0.33	2021	2494	701	0.3355	0.00
10	4.9	0.86	2828	3164	1849	0.0729	0.90
10	4.9	0.72	2606	2961	1543	0.0812	0.50
10	4.9	0.47	2203	2544	1004	0.1276	0.00
10	4.9	0.40	2047	2379	841	0.2151	0.00
10	4.9	0.33	1863	2187	701	0.5240	0.00
10	3.3	0.86	2732	2808	1849	0.0754	0.85
10	3.3	0.72	2478	2590	1543	0.0850	0.30
10	3.3	0.60	2194	2364	1291	0.1439	0.00
10	3.3	0.47	1921	2110	1004	0.3940	0.00

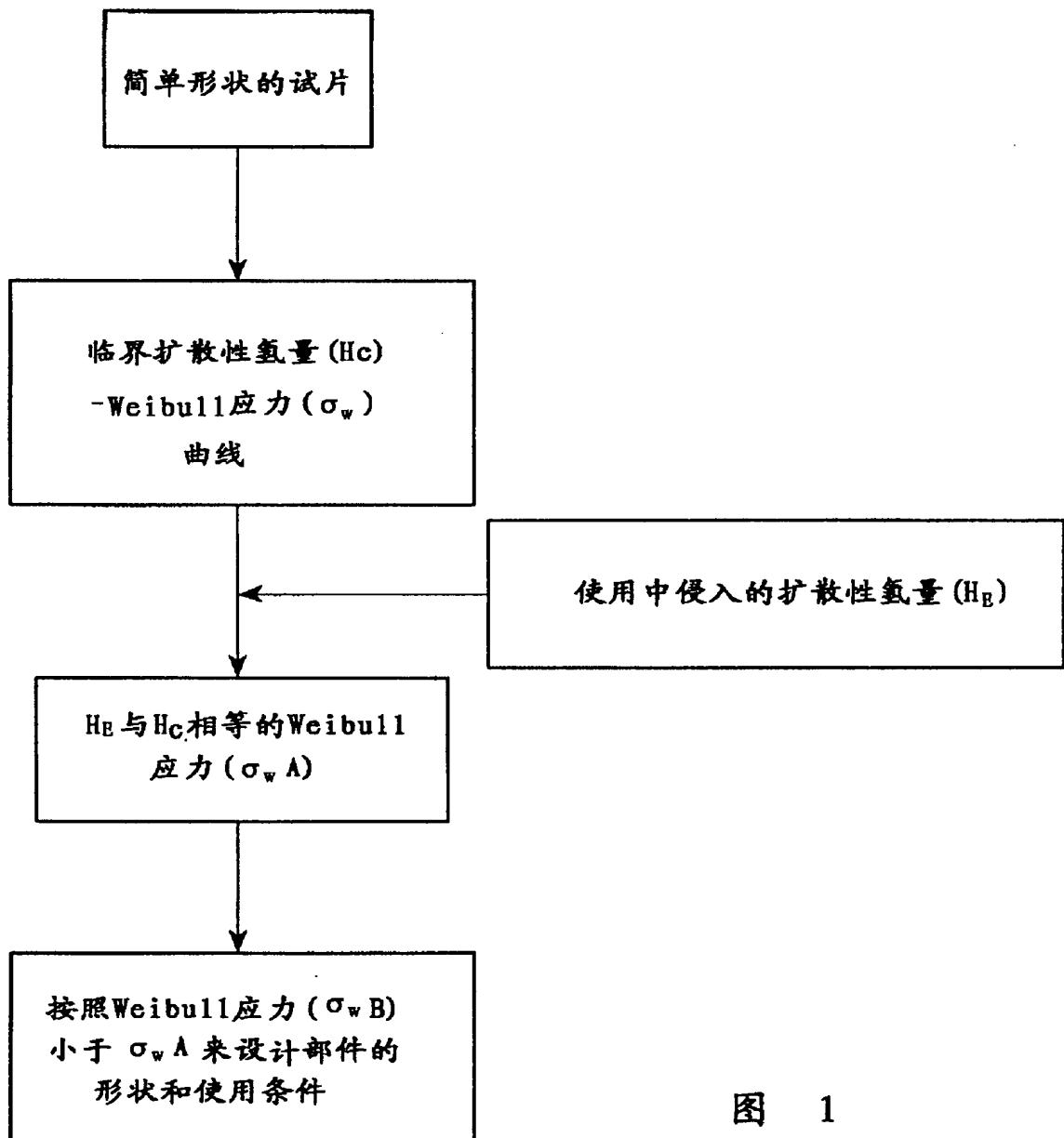


图 1

01.09.03

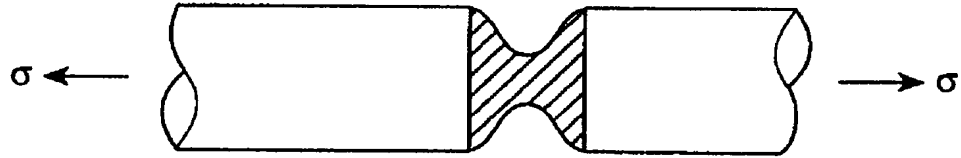


图 2

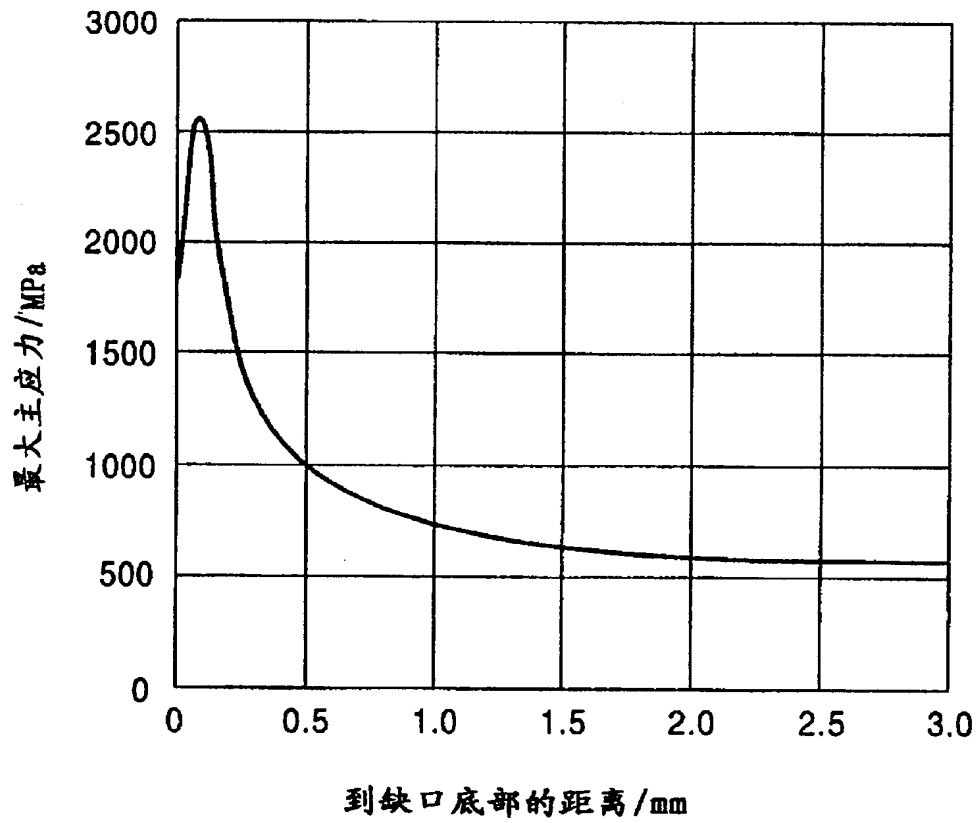


图 3

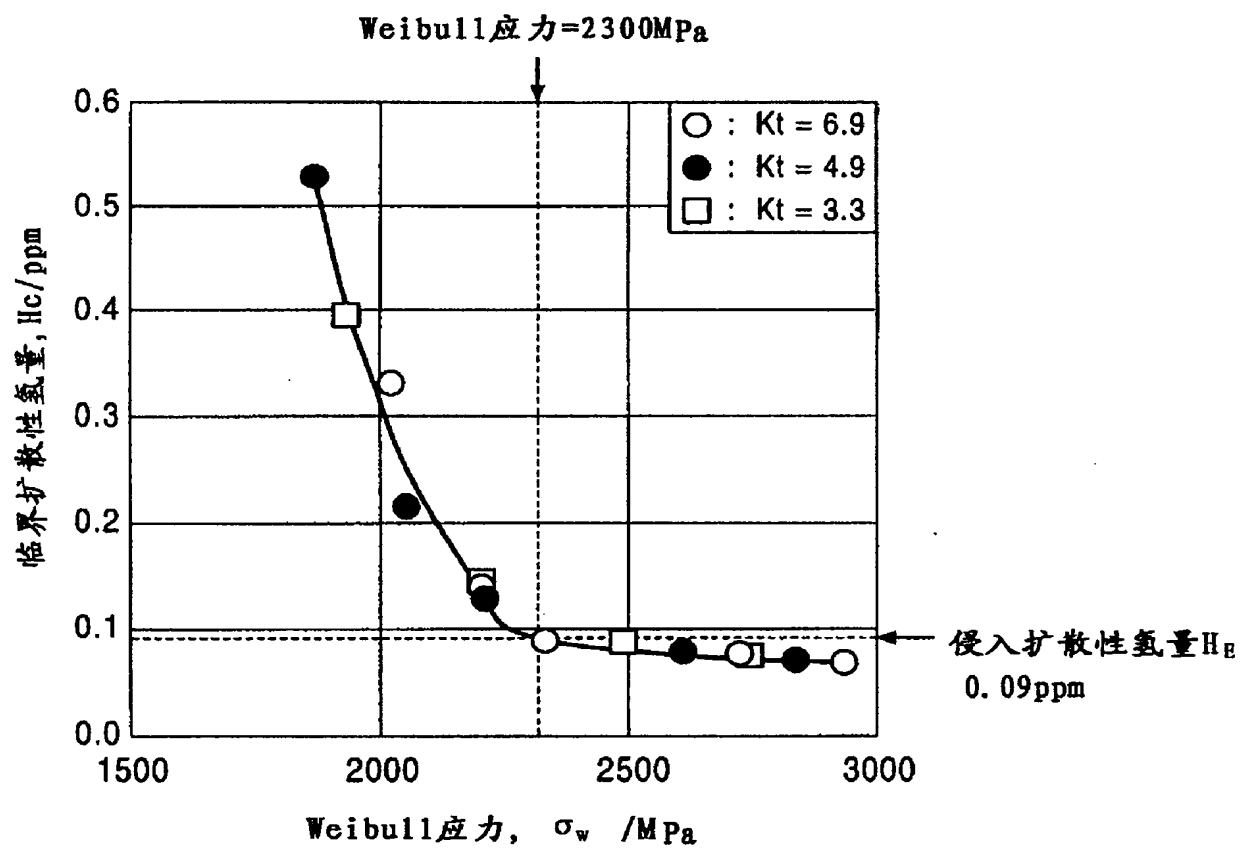


图 4

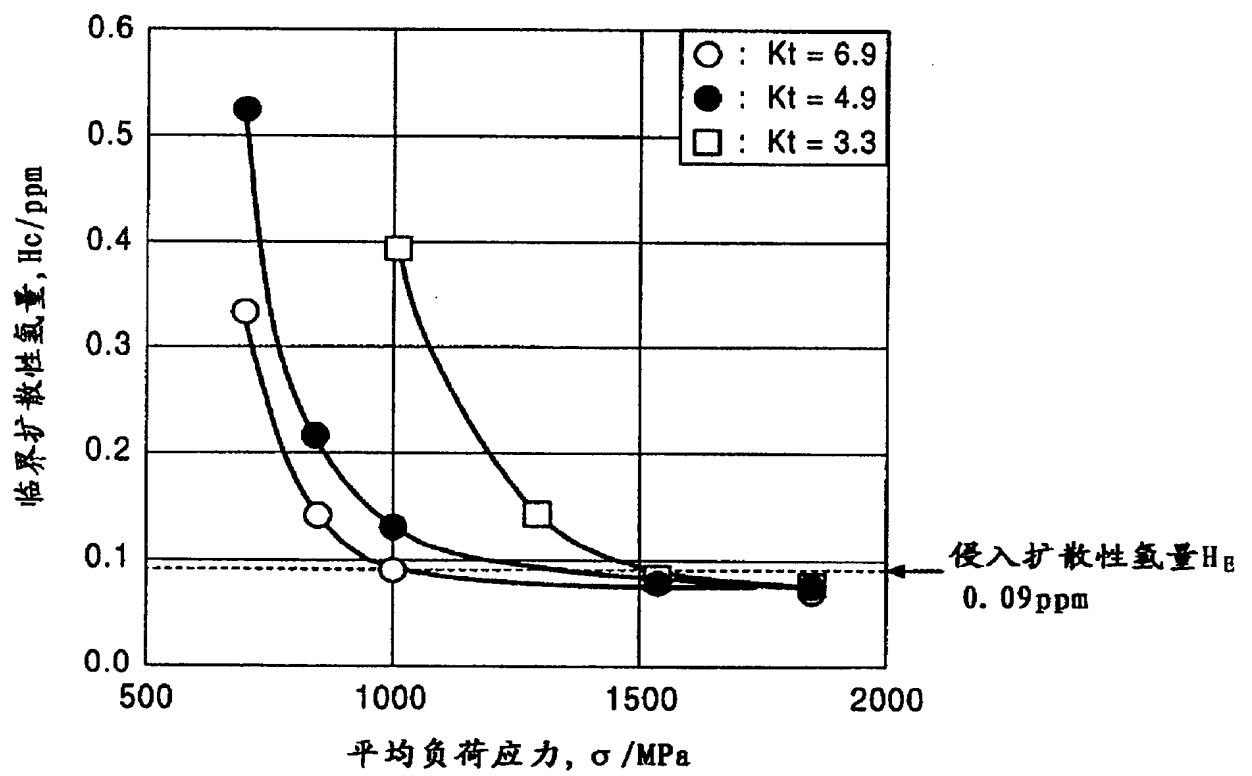


图 5

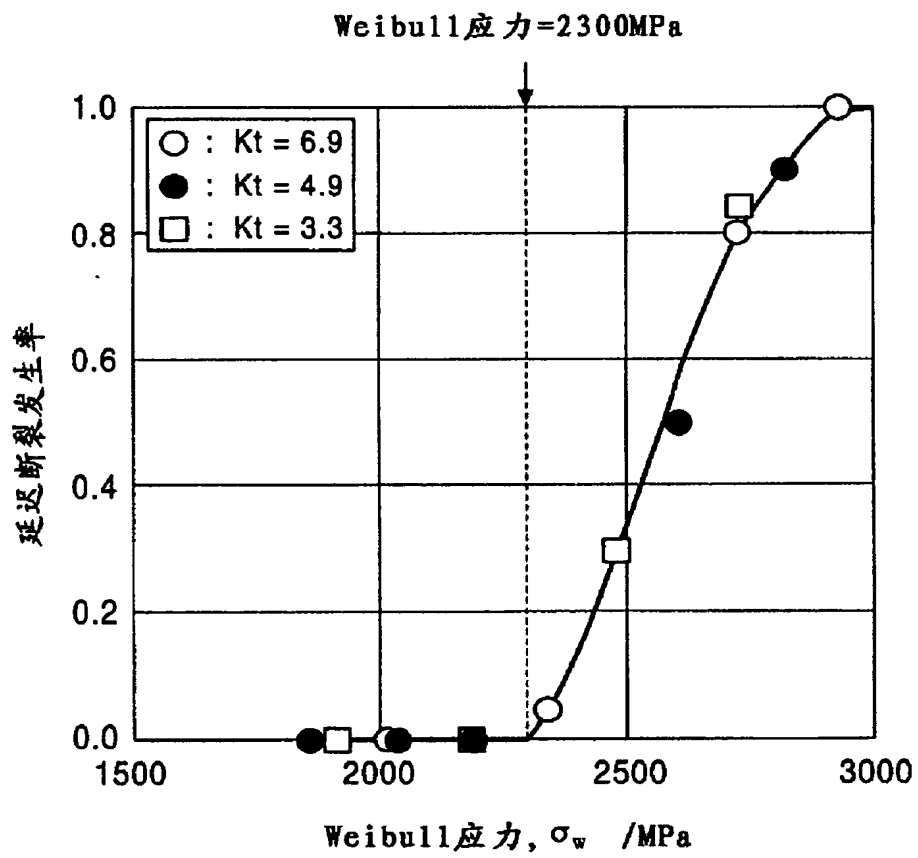


图 6

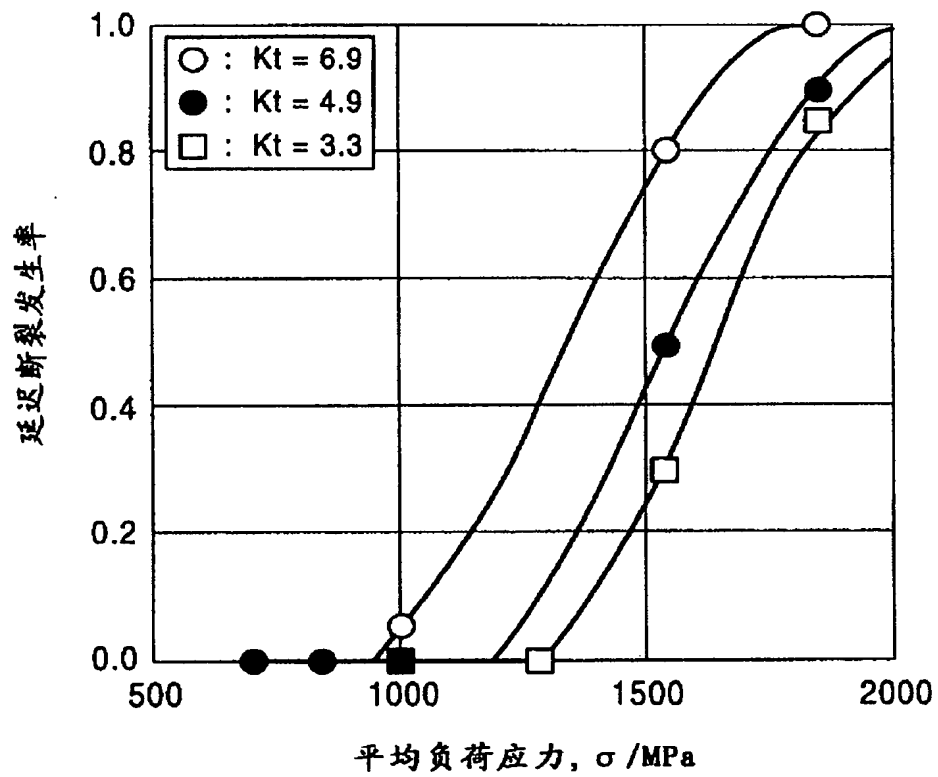


图 7